非自明な磁気・電子状態を持つ金属磁性体における磁気輸送特性

筑波大学 理工情報生命学術院 数理物質科学研究群 応用理工学学位プログラム
物性・分子工学サブプログラム　博士後期課程 3 年　古橋　智実

固体の物性には、電子が持つスピン・電荷・軌道の自由度が大きく関係している。近年、これらの内部自由度に加えて、磁気状態や電子状態のトポロジーが物性を理解する上で重要な役割を果たすことが明らかになってきた。例えば、実空間でトポロジカルなスピン配列を持つ磁気スキルミオンは、創発磁場（ベリー曲率）を介してトポロジカルホール効果を生じさせる。一方、運動量空間におけるバンドの交差点（ワイル点）がベリー曲率の湧き出し・吸い込みに対応する磁気ワイル半金属では、巨大異常ホール/ネルンスト効果などが生じることが知られている。このような電磁気応答は、基礎物理のみならず、スピントロニクスや熱電変換素子への応用の観点からも関心が持たれている。以上の背景から、発表者は、トポロジカルに非自明な磁気・電子状態に着目し、金属磁性体においてそれらが誘起する新奇な輸送特性を明らかにすることを目指して研究を行ってきた。

実空間のスピン構造に由来するトポロジカルホール効果は、スキルミオンのような静的な磁気構造だけでなく、熱揺らぎによっても巨大なホール応答を誘起する可能性が指摘されている[1]。三角形の頂点共有によって形成される二次元的な構造であるカゴメ格子は、スピン液体状態などの非自明な磁気励起が生じ得る典型的な舞台である。そこで、磁性を担う Dy サイトが歪んだカゴメ格子を形成する金属磁性体 DyAgGe に着目した。本系では、複数の磁気相が狭い磁場範囲で競合することが明らかとなり、それに関連すると考えられる非自明な異常ホール効果を磁気秩序相より高温で観測した[2, 図 1(a)]。これにより、多重相競合に由来するスピンの熱揺らぎが、輸送特性に関与する可能性が示唆された。

ワイル半金属における輸送特性は、一電子近似の成り立つ領域では理解が進んでいる。一方で、電子相関効果が強く働く系では、ベリー曲率と電磁気応答の関係について十分に理解されていない。そこで、近藤混成によって形成される重い電子バンドにワイル点が存在する可能性が議論されている磁気ワイル近藤金属候補物質 $CeCo_{1-x}Fe_xGe_3$ に着目した。本系では Fe ドープ量によって近藤効果の強さを制御し、輸送特性を系統的に調べることで、近藤効果がトポロジカルな電子状態に及ぼす影響を検討した[3]。その結果、近藤効果によって電子状態が大きく変化する際に、ベリー曲率も大きく変化し[図 1(b, c)]、外場に敏感な輸送特性が見られる事がわかった。

近年、上記の磁気状態・電子状態のトポロジカルな性質に起因するベリー曲率に加えて、量子計量と呼ばれる物理量も物性に大きな影響を及ぼすとして関心が集まっている[4]。これらは運動量空間における波動関数の幾何学的性質を特徴づける量子幾何の虚部（ベリー曲率）と実部（量子計量）に対応している。発表者は現在、量子計量が物性に及ぼす影響を調べるために平坦バンド系にも着目し、Cr_4PtGa_{17} の基礎物性と電子状態を調べている[5, 図 1(d)]。上記の二つの物質と Cr_4PtGa_{17} における電子状態や輸送特性等の最近の進展について当日紹介する。

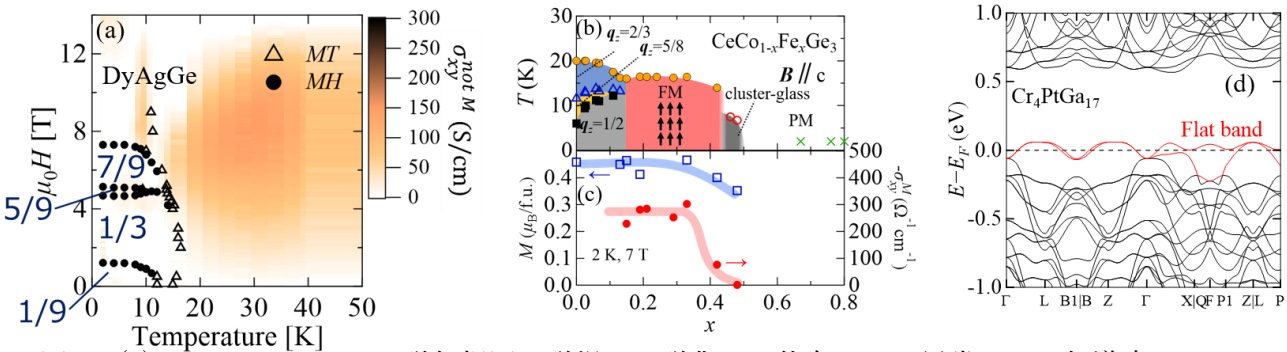


図 1. (a) DyAgGe における磁気相図と磁場にも磁化にも依存しない異常ホール伝導度。$CeCo_{1-x}Fe_xGe_3$ の(b)磁気相図と(c)磁化および異常ホール伝導度の組成依存性。(d) Cr_4PtGa_{17} におけるバンド構造計算結果。

[1] N. Abe *et al.*, npj Quantum Mater. **9**, 41 (2024). [2] T. Furuhashi *et al.*, Phys. Rev. B **112**, 224408 (2025).
[3] T. Furuhashi *et al.*, Phys. Rev. B **112**, 245116 (2025). [4] A. Gao *et al.*, Rev. Mod. Phys. **98**, 035005 (2026).
[5] X. Gui *et al.*, J. Am. Chem. Soc. **143**, 14342 (2021).